

Lidia BUDA-OŻÓG*
Politechnika Rzeszowska

OCENA USZKODZENIA ELEMENTÓW BELKOWYCH NA PODSTAWIE ZMIANY PARAMETRÓW MODALNYCH Z ZASTOSOWANIEM SIECI NEURONOWYCH

Streszczenie. Artykuł przedstawia metodę oceny stopnia uszkodzenia belek żelbetowych niewzmocnionych i wzmocnionych taśmami z włókna węglowego CFRP na podstawie zmiany parametrów modalnych. Belki obciążano etapami aż do zniszczenia w celu wywołania uszkodzeń o różnym stopniu i mechanizmie zniszczenia. Dla każdego etapu obciążenia, po odciążeniu w chwili stabilizacji mierzonych ugięć i odkształceń, wyznaczano parametry modalne, tj. częstotliwości rezonansowe i odpowiadające im postacie drgań. Do oceny stanu technicznego belek żelbetowych na podstawie analizy zmian częstotliwościowych zastosowano sztuczne sieci neuronowe.

DAMAGE EVALUATION OF BEAM ELEMENTS BASED ON MODAL PARAMETERS CHANGES WITH THE USE OF NEURAL NETWORKS

Summary. This paper discusses methods of diagnosing the damage of reinforced concrete beams not strengthened and strengthened with CFRP plates, based on the change of modal parameters. The beams have been loaded step by step. After each load step the beams were unloaded, and when the measured displacements and strains stabilized, modal parameters (resonant frequencies and their mode shapes) were determined. To carry out the concept of the diagnosis concrete beams, on the basis of modal parameters changes, Neural Networks was applied.

* Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Leonard Ziemiański.

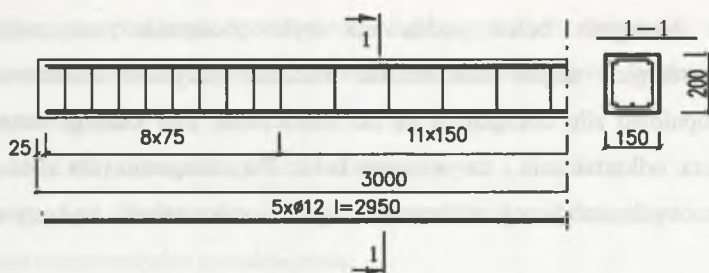
1. Wprowadzenie

Rozwój nieniszczących metod diagnozowania stanu technicznego całych konstrukcji lub poszczególnych elementów konstrukcyjnych jest tematem wielu prac badawczych ostatnich lat [1, 2]. Metody te mają duże znaczenie w procesie diagnozowania konstrukcji inżynierskich o szczególnym przeznaczeniu, takich jak mosty, wszelkiego typu zbiorniki, platformy wiertnicze, obiekty użyteczności publicznej itp., w których pojawienie się najmniejszego uszkodzenia ma istotne znaczenie dla dalszej eksploatacji. Wizualna ocena stanu konstrukcji była i nadal jest najbardziej popularną metodą wykrywania uszkodzeń, jednak tradycyjna metoda wizualnej oceny w wielu przypadkach, np. gdy bezpośredni dostęp do konstrukcji musi być poprzedzony demontażem, jest kosztowna i pracochłonna. Dodatkowo wizualna ocena może być subiektywna, a także błędna w przypadku niezauważenia uszkodzenia przez ludzkie oko. Nieniszczące metody oceny stanu konstrukcji, takie jak: akustyczne ultrasonograficzne, radiologiczne, radarowe i termograficzne, dostarczają informacji o cechach wytrzymałościowych i strukturalnych materiałów i są „lokalnymi” metodami oceny konstrukcji. Alternatywą dla powyższych metod stają się tzw. metody globalne, oparte na analizie rozchodzenia się fali w ośrodku sprężystym lub analizie parametrów modalnych [3].

W pracy skupiono się nad oceną stanu konstrukcji na podstawie zmiany parametrów modalnych, to jest częstotliwości drgań rezonansowych oraz odpowiadających im postaci drgań. Zaproponowana procedura diagnostyczna opiera się na analizie dynamicznej odpowiedzi konstrukcji na dowolne wymuszenie, otrzymanej w postaci charakterystyki częstotliwościowej przed uszkodzeniem i po uszkodzeniu. Do opracowania algorytmu diagnozowania stanu technicznego badanych elementów żelbetowych na podstawie zmian częstotliwości rezonansowych wykorzystano sztuczne sieci neuronowe.

2. Opis belek żelbetowych

Obiektem badań były belki żelbetowe oraz belki żelbetowe wzmocnione taśmami z włókna węglowego (CFRP), o wymiarach i sposobie zbrojenia przedstawionych na rysunku 1.



Rys. 1. Wymiary i zbrojenie belki żelbetowej
Fig. 1. Dimensions and reinforcement of beams

Belki wykonywano etapami w kilku terminach. Każdorazowo u dostawcy betonu zamawiany był beton tej samej klasy i konsystencji (B-20K4) oraz o tej samej recepturze i uziarnieniu zastosowanego kruszywa. Średnią wytrzymałość betonu na ściskanie oraz średnią gęstość objętościową betonu dla poszczególnych partii betonu zestawiono w tabeli.

Tabela 1

Średnia wytrzymałość na ściskanie
oraz gęstość objętościowa dla poszczególnych partii betonu

Oznaczenie belek	f_{ck} [MPa]	ρ [kg/m ³]
B1, B2	30,3	2187
B3, B4	30,0	2197
B5, B6	31,0	2211
B7, B8, W2,	30,1	2328
B9, B10, W1,	32,0	2264
B11, B12, W3,	29,7	2237

Dla rozróżnienia belki oznaczono w zależności od struktury :

- B1 do B12 – belki żelbetowe, podparte przegubowo w odległości 10 cm od początku i końca belek;
- W1 do W3 – belki żelbetowe, przegubowo podparte w odległości 10 cm od początku i końca belek, wzmocnione w strefie rozciąganej taśmami z włókna węglowego CFRP.

3. Metodyka badań

Metodyka prowadzonych badań diagnostycznych składała się z badań statycznych i badań dynamicznych. Pierwszy etap polegał na wykonaniu wstępnych badań dynamicznych. Był to pomiar charakterystyk dynamicznych, będący odniesieniem dla kolejnych pomiarów

dynamicznych. Następnie belka poddawana była obciążeniu statycznemu w celu spowodowania różnych stopni uszkodzenia. Badania statyczne realizowano etapami, zwiększając stopniowo siłę obciążającą aż do zniszczenia. Dla każdego etapu obciążenia mierzono ugięcia, odkształcenia i zarysowania belek. Po odciążeniu (dla każdego z etapów obciążenia), w chwili stabilizacji mierzonych ugięć i odkształceń, wykonywano badania dynamiczne.

3.1. Wyniki badań statycznych

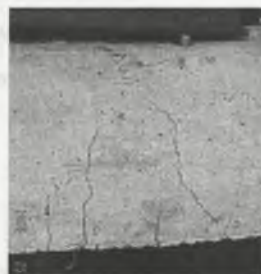
Dla każdej grupy badanych belek, tj. B1 do B12 oraz W1 do W3, na podstawie pomierzonej liczby rys, ich szerokości, długości oraz rozkładu naprężeń w przekroju zginanym [4], dokonano podziału na stopnie uszkodzenia belek. W przypadku belek żelbetowych B1 do B12 utworzono cztery stopnie uszkodzenia odpowiadające fazom pracy belki w trakcie zginania. Utworzone stopnie uszkodzenia belek zdefiniowano w sposób następujący:

- D1 – belki niezarysowane,
- D2 – belki zarysowane, rysy od zginania o szerokości 0,1 do 0,3 mm podczas obciążenia, po odciążeniu o szerokości mniejszej niż 0,1 mm (rysunek 2a),
- D3 – belki zarysowane, rysy od zginania o szerokości do 1mm podczas obciążenia, po odciążeniu rysy o szerokości 0,1 do 0,2 mm, niektóre z wcześniej powstałych rys zamykają się, a inne gwałtownie powiększają, nie powstają już nowe rysy,
- D4 – propagacja rysy do strefy ściskanej z jednoczesnym kruszeniem się betonu w strefie ściskanej, rysy o szerokości ponad 1,0 mm (rysunek 2b).

a)



b)



Rys. 2. Rozwój zarysowania dla przyjętych stopni uszkodzenia belki: a) stopień uszkodzenia D2, b) stopień uszkodzenia D4

Fig. 2. Crack pattern and damage: a) state D2, b) state D4

Analogicznie, na podstawie pomierzonej liczby rys, ich szerokości oraz długości, utworzono stopnie uszkodzenia belek żelbetowych wzmocnionych taśmami CFRP, które zdefiniowano następująco:

- DW1 – belki niezarysowane podczas obciążenia,
- DW2 – rysy od zginania o szerokości 0,1 do 0,3 mm, widoczne podczas obciążenia, natomiast niezauważalne po odciążeniu,
- DW3 – belki zarysowane od zginania, pojawienie się rys ścinających o szerokości 0,4 mm podczas obciążenia, a po odciążeniu rysy o szerokości 0,1 mm.
- DW4 – zniszczenie w wyniku odspojenia taśm wzmacniających (rysunek 3).



Rys. 3. Stopień uszkodzenia DW4 – zniszczenie belki w wyniku odspojenia taśmy wzmacniającej
Fig. 3. State DW4 – failure of RC beam strengthened with CFRP

3.2. Wyniki badań dynamicznych

W przeprowadzonych badaniach dynamicznych dla każdej belki i każdego etapu obciążenia mierzono przyspieszenie drgań belki. Przyspieszenie drgań belki mierzono w 8 punktach jednocześnie, przy wymuszeniu, w co najmniej trzech niezależnych punktach. W wyniku sygnału wyjściowego transformaty Fouriera w ustalonym stanie ruchu, otrzymano charakterystyki częstotliwościowe, z których odczytano częstotliwości rezonansowe i odpowiadające im postaci drgań. Z całego widma charakterystyki częstotliwościowej od 0 do 500 Hz wybrano pięć częstotliwości rezonansowych konstrukcji, które niosą informacje o stopniu uszkodzenia elementu. Dysponując pomiarem wstępnym (odniesienia) wyliczono zmiany procentowe wartości częstotliwości rezonansowych w zależności od stopnia uszkodzenia belek. Dla każdej grupy opisującej stopień zarysowania sprawdzono zgodność otrzymanych wyników z rozkładem normalnym, a następnie wyznaczono parametry statystyczne – wartość średnią i odchylenie standardowe zaobserwowanych zmian

procentowych. Otrzymane wyniki, odpowiednie dla belek B1+B12 i W1+W3, zestawiono w tabelach 2 i 3.

Tabela 2

Zmiany procentowe częstotliwości rezonansowych belek B1+B12,
w zależności od stopnia uszkodzenia

Stopień uszkodzenia	Średnie wartości zmian procentowych ± odchylenie standardowe				
	f1	f 2	f 3	f4	f 5
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
D1	0,6 ± 0,8	0,1 ± 0,4	0,2 ± 0,6	0,4 ± 0,8	0,3 ± 0,5
D2	8,8 ± 2,2	4,8 ± 2,5	2,1 ± 1,4	5,0 ± 1,6	7,7 ± 2,6
D3	14,5 ± 2,5	8,9 ± 2,3	4,1 ± 1,1	7,8 ± 1,4	13,3 ± 2,1
D4	25,1 ± 1,7	13,6 ± 1,4	7,9 ± 1,2	11,3 ± 3,3	19,2 ± 2,5

Tabela 3

Zmiany procentowe częstotliwości rezonansowych belek W1+W3,
w zależności od stopnia uszkodzenia

Stopień uszkodzenia	Średnie wartości zmian procentowych ± odchylenie standardowe				
	f1	f 2	f 3	f4	f 5
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
DW1	1,4 ± 1,3	1,3 ± 1,1	0,4 ± 0,3	0,5 ± 0,6	0,8 ± 0,9
DW2	7,6 ± 1,4	3,3 ± 1,1	2,3 ± 1,0	3,7 ± 1,8	3,2 ± 1,3
DW3	10,4 ± 0,1	4,2 ± 0,7	3,6 ± 2,1	7,8 ± 2,0	3,8 ± 0,9
DW4	19,2 ± 2,0	9,3 ± 1,2	6,1 ± 0,5	14,2 ± 2,2	7,8 ± 2,4

4. Zastosowanie sieci neuronowych do oceny stopnia uszkodzenia belek

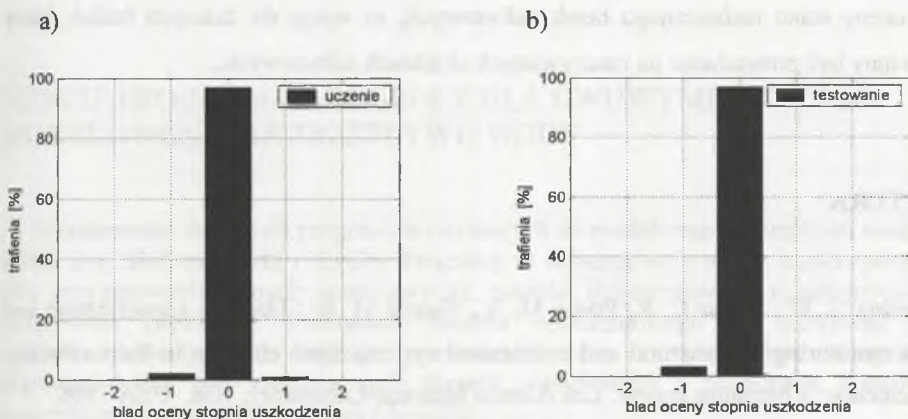
Korzystając z doświadczeń przedstawionych w pracy [5], do diagnozowania stanu technicznego belek żelbetonowych na podstawie zmiany wybranych częstotliwości rezonansowych zastosowano sieci neuronowe ze wsteczną propagacją błędu (WPB), wykorzystując algorytm uczenia sieci Levenberga-Marquardta. Idea zastosowania sztucznych sieci neuronowych do oceny stanu technicznego belek polega na nauczaniu sieci odwzorowania zmian częstotliwości otrzymanych z eksperymentu, na zmiany stanu technicznego konstrukcji określone przez przyjęte stopnie uszkodzenia.

Do diagnozowania stanu elementów betonowych zastosowano jednokierunkową sieć neuronową, składającą się z trzech warstw:

- warstwy wejściowej, którą stanowią procentowe zmiany wybranych częstotliwości rezonansowych,

- jednej warstwy ukrytej o wymiarze dobranym eksperymentalnie na podstawie liczby wejść, wyjść oraz liczby wzorców,
- warstwy wyjściowej, opisującej stopień uszkodzenia belek.

W celu optymalnego doboru struktury sieci przeprowadzono badania symulacyjne, które pozwoliły na określenie wpływu liczby wejść oraz wymiaru warstwy ukrytej na jakość oceny stopnia uszkodzenia belek. Kryterium jakie zastosowano przy wyborze najlepszej architektury sieci była najmniejsza średnia wartość średniego kwadratu błędu testowania oraz najmniejsza różnica błędu MSE uczenia i testowania uzyskana podczas 50 powtórzeń procesu trenowania sieci. Najkorzystniejsze wyniki, uwzględniając przyjęte kryterium oceny architektury sieci, zostały uzyskane w przypadku belek żelbetowych B1÷B12, dla sieci o architekturze 4-5-1 i w sektorze wejściowym zawierającym zmiany 1, 2, 4, 5 częstotliwości rezonansowej. Przykładowe wyniki uczenia i testowania sieci o architekturze 4-5-1 przedstawia rysunek 4.



Rys. 4. Identyfikacja stopnia uszkodzenia belek żelbetowych: a) uczenie, b) testowanie

Fig. 4. The results of estimation of RC beams damage states: a) learning, b) testing

Przedstawione na rysunkach wyniki pokazują, że sieć o architekturze 4-5-1 w 97% prawidłowo identyfikuje stopnie uszkodzenia belki żelbetowej na podstawie zmian wybranych częstotliwości rezonansowych. Około 3% wyników podczas testowania zostało przez sieć źle zidentyfikowanych.

W przypadku belek żelbetowych wzmocnionych taśmami CFRP najlepsze wyniki otrzymano dla sieci o architekturze 2-5-1. Dla wektora wejściowego, zawierającego zmiany jeden i dwa z wybranych częstotliwości rezonansowych i w pięciu neuronach w warstwie ukrytej, sieć z 99% skutecznością prawidłowo rozpoznawała stopień uszkodzenia belki.

5. Podsumowanie

Analizując wyniki przeprowadzonych badań doświadczalnych i symulacji numerycznych można sformułować następujące spostrzeżenia:

- Istnieje korelacja pomiędzy procentowymi zmianami częstotliwości rezonansowych, a stopniem zarysowania belek. Można zatem ocenić stan techniczny belek żelbetowych i wzmocnionych taśmami CFRP na podstawie zmian charakterystyk częstotliwościowych. Ocena ta powinna być dokonana na podstawie analizy zmian co najmniej dwóch częstotliwości rezonansowych.
- Zastosowanie sieci neuronowych w ocenie stopnia uszkodzenia belek żelbetowych na podstawie zmiany wartości częstotliwości rezonansowych przynosi zadawalające rezultaty.
- Przeprowadzone badania doświadczalne, ich analiza i zastosowanie sieci neuronowych do oceny stanu technicznego belek żelbetowych, to wstęp do dalszych badań, które powinny być prowadzone na rzeczywistych obiektach żelbetowych.

LITERATURA

1. Deobeling S. W., Farrar C. R., Prime M. B., Sheritz D. W.: Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristic: a literature review. Los Alamos National Laboratory, NM, USA 1996.
2. Vestroni B. F., Capecchi D.: Damage Detection in Beam Structures Based on Frequency Measurements. Journal of Engineering Mechanics, No. 7, 2000, p. 761-768.
3. Ren W., De Roeck G.: Structural Damage Identification using Modal Data. Journal of Structural Engineering, No. 1, 2002, p. 87-104.
4. PN-B-03264:2002. „Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie”.
5. Waszczyszyn Z., Ziemiański L.: Neural Networks in Mechanics of Structures and Materials – New Results and Prospect of Applications. Computers and Structures, No. 79, 2001, p. 2261-2276.